

Anwendungen von Hochtemperatur- Supraleitern in der elektrischen Energieversorgung

Lindmayer, Manfred

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 2005 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.99-108



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Anwendungen von Hochtemperatur-Supraleitern in der elektrischen Energieversorgung*

MANFRED LINDMAYER

Elektrische Energieanlagen, TU Braunschweig
Schleinitzstraße 23A, D-38106 Braunschweig

1. Einführung

Bild 1 zeigt das stark vereinfachte Prinzip der elektrischen Energieversorgung und die darin eingesetzten Betriebsmittel. Im Prinzip könnten an allen Stellen statt der heutigen konventionellen Technik mit Kupfer- oder Aluminiumleitern Betriebsmittel mit supraleitenden Komponenten eingesetzt werden. Die Anwendung der Supraleitung in Netzen der elektrischen Energieversorgung wurde in Einzelfällen bereits in den 70er Jahren, lange vor der Entdeckung der keramischen Hochtemperatur-Supraleiter diskutiert und untersucht. Die damals allein zur Verfügung stehenden „Tieftemperatur“-Supraleiter (TTSL) aus Niob-Legierungen (NbTi, kritische Temperatur $T_C=9$ K und Nb₃Sn, $T_C=18$ K) erforderten eine aufwendige und teure Kühltechnik auf der Basis von Flüssig-Helium (4,5 K). Die Tieftemperatur-Technik konnte wegen der hohen Kosten und des

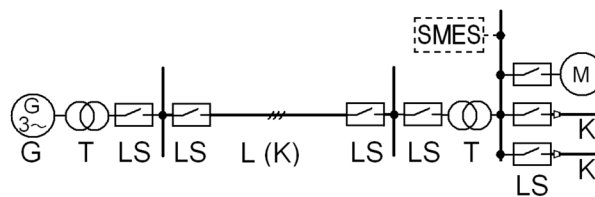


Bild 1: Schema der el. Energieversorgung
G Generator, L Leitung, T Transformator, M Motor, K Kabel,
LS Leistungsschalter (Kurzschlußschutz)
SMES supraleitender magn. Energiespeicher
(nur supraleitend realisierbar)

* Vortrag gehalten am 11.02.2005 in der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

betrieblichen Aufwandes aber nicht in die elektrische Energieversorgung Eingang finden. Neue Impulse mit einer Vielzahl von Forschungsprojekten weltweit löste die Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (HTSL) vor fast zwei Jahrzehnten aus. Die kritische Temperatur dieser keramischen Materialien liegt mit z.B. ca. 90 K (YBCO) oder 110 K (BSCCO 2223) so hoch, daß der Betrieb in vielen Anwendungen mit dem wesentlich einfacher zu handhabenden und kostengünstigeren Flüssig-Stickstoff (LN₂), dessen Siedetemperatur bei Normaldruck bei 77 K (-196 °C) liegt, möglich ist. In anderen Fällen sind zwar tiefere Temperaturen, z.B. 30-40 K, notwendig. Hier stehen jedoch einfache und robuste Kryokühler zur Verfügung, deren Verluste viel geringer als bei der 4,5 K-Technik sind.

Pauschal werden für die Supraleitertechnik insgesamt folgende Vorteile ins Feld geführt:

- Verbesserter Wirkungsgrad (geringere Verluste)
- geringere Größe, geringeres Gewicht
- verbesserte Energiequalität (power quality)
- erhöhte Systemzuverlässigkeit
- Geringere Umweltbelastung, u.a. CO₂-Reduzierung

Der Vortrag gibt einen Überblick über mögliche Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleitung in Netzen der elektrischen Energietechnik, wobei insbesondere auf die technischen Besonderheiten eingegangen wird. Aus Zeitgründen erfolgt dabei eine Beschränkung auf die drei Betriebsmittel Synchronmaschinen, Kabel und Strombegrenzer. Weitere Anwendungen sowie Details können [1] entnommen werden.

2. Leitermaterialien und -formen

Nachstehend sind die Supraleiter aufgeführt, die in bisherigen Energietechnik-Projekten größere Bedeutung erlangt haben:

a) Massivmaterialien

YBCO 123 ($\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$) mit $T_C \approx 90$ K. Die Zahlen sind die Molzahlen der ersten drei Komponenten. BSCCO 2223 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$) mit $T_C \approx 110$ K und BSCCO 2212 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_{8-x}$) mit $T_C = 80-90$ K. Typische kritische Stromdichten von Massivmaterialien, die vielfach über Schmelzverfahren hergestellt werden, liegen zwischen 10^3 und $4 \cdot 10^4$ A/cm² bei 77 K. Ihre Anwendungsfälle liegen bei kryotechnischen Hochstromzuführungen, Strombegrenzern, Maschinen oder Magnetlagern.

b) Drahtförmiges Verbundmaterial

(Bi,Pb)BSCCO 2223 mit Ag-Mantel, sog. „Powder-in-Tube“ Material. Durch Bündelung mehrerer Ag/BSCCO-Rohre und Deformation beim Herstellprozess

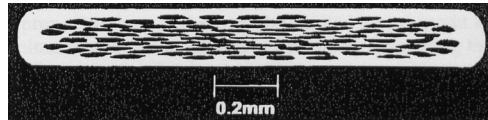


Bild 2: Querschnitt durch einen BSCCO-Multifilament-Leiter mit Ag-Matrix

entstehen sog. Multifilament-Leiter, siehe Bild 2. Durch Legierungszusätze zum Ag kann die mechanische Festigkeit verbessert oder die thermische und elektrische Leitfähigkeit verringert werden. Die Ag-Matrix stabilisiert den Leiter im Betrieb gegen lokale Überlastung. Ihr aus Kostensicht wünschenswerter Ersatz durch das billigere Kupfer oder andere Metalle ist nicht möglich, da Ag aus reaktionskinetischen Gründen bei der Herstellung benötigt wird. Eine Variante ist für höhere Festigkeit zusätzlich mit Edelstahlschichten laminiert. Die kritische Stromdichte dieser Leiter, bezogen auf den Gesamtquerschnitt, beträgt bis $1,5 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$. Diese in großen Längen bereits industriell gefertigten Drähte sind das bisherige „Standardmaterial“ für Kabel und Wicklungen in Maschinen, Transformatoren und HTS-SMES.

- c) *Dünnschicht- ($<1\mu\text{m}$) YBCO 123 auf keramischen Substraten, z.B. 0.5 mm dick.*

Diese einkristallinen Schichten weisen sehr hohe kritische Stromdichten bis über $3 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$ auf. Voraussetzung dafür ist ein orientiertes Wachstum der YBCO-Kristalle auf dem tragenden Substrat, da YBCO aufgrund seiner Kristallstruktur anisotrope Materialeigenschaften aufweist. Eine gute Orientierung (Textur) kann aber nur mit angepassten Gitterkonstanten von Substrat und YBCO erreicht werden. Deshalb wird häufig mit dünnen (wenigen 10 nm) Zwischenschichten gearbeitet, und es sind nur wenige teure Substrate bzw. Substrat-Zwischenschicht-Kombinationen geeignet. Solche Dünnschicht/Substrat-Kombinationen, wie sie sonst für die Informationstechnik eingesetzt werden, eignen sich für supraleitende Strombegrenzer.

- d) *Dünnschicht-YBCO auf Metallbändern (Ni-Legierungen, Edelstahl)*

Die Eigenschaften der Dünnschichten entsprechen prinzipiell c). Aus dieser Kombination können einige mm breite, dünne und flexible „Drähte“ hergestellt werden, die als „second generation“ der Bandleiter (vgl. Bild 2) bezeichnet werden. Man erwartet vielseitig verwendbare Leiter mit besseren Daten und zu Kosten, die weit unter denen bisheriger Leiter liegen sollen (Ziel 10 \$/(kA·m)). Wegen des vorstehend geschilderten Sachverhaltes ist ein Aufbau mit mehreren Zwischenschichten erforderlich, siehe Bild 3.

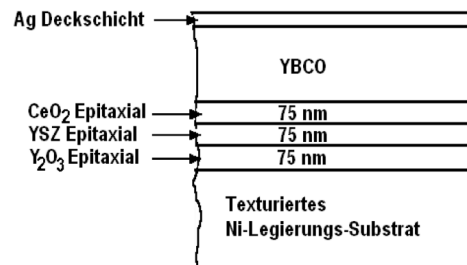


Bild 3: YBCO-Dünnschicht auf Metallsubstrat mit Zwischenschichten im Querschnitt

3. Betriebsmittel mit HTSL

3.1 Elektrische Maschinen, Synchronmaschinen

Bei bisherigen größeren Projekten im internationalen Maßstab standen überwiegend Synchrongeneratoren bzw. -Motoren im Vordergrund. Auf sie soll hier eingegangen werden. Bereits in den 70er Jahren wurde an Generatoren mit TTSL-Erregerwicklungen gearbeitet. Man hatte damals noch größerer Generatorgrenzleistungen für Kernkraftwerke im Auge, die man mit normalleitenden Erregerwicklungen nicht erzielen konnte. Inzwischen steht diese Motivation nicht mehr im Vordergrund. Der Grundaufbau ist aber bei neueren Versuchsmaschinen ähnlich, jedoch sind sie in der Leistung und Größe kleiner. Die supraleitende rotierende Feldwicklung (Erregerwicklung) befindet sich in einem Kryostaten, der, wie in der Kryotechnik Standard, Vakuum zur thermischen Isolierung verwendet. Die konventionelle Kupfer-Ankerwicklung im Stator befindet sich auf Raumtemperatur. Das Magnetfeld der rotierenden Feldwicklung ist höher als bei herkömmlichen Maschinen, da der Erregerstrom wegen der fehlenden Kupferverluste höher sein kann. Typisch sind Flußdichten von 1,5 bis 2 T, gegenüber konventionellen Maschinen etwa doppelt so hoch. Insgesamt ist das Volumen der Maschine, und da auch weit weniger Eisen verwendet wird, das Gewicht deutlich geringer. Weniger Eisen und der wegen der Kryoisolation ohnehin größere Luftspalt bewirken eine sehr geringe Synchronreaktanz (0,15 bis 0,5 p.u. gegenüber 1,5 bis 2,5 bei herkömmlichen Synchronmaschinen). Insgesamt ist dadurch das Verhalten am Netz viel robuster, und es muß weniger regelungstechnischer Aufwand getrieben werden.

Wegen der Kompaktheit und des geringeren Gewichts sind neben Generatoren auch Anwendungen als supraleitende Synchronmotoren sehr interessant, insbesondere für den Antrieb von militärischen und zivilen Schiffen. Sowohl Kosten als auch kostbares Lade- bzw. Passagiervolumen und -Gewicht werden einge-

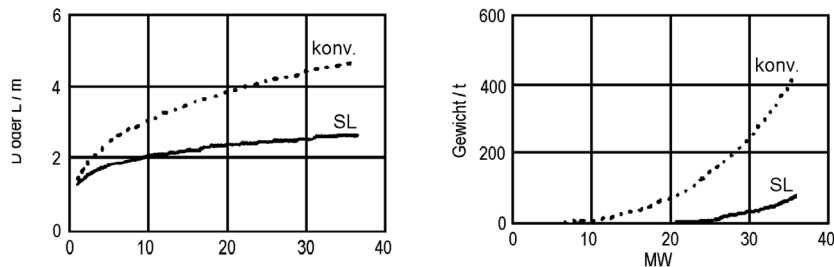


Bild 4: Volumen- und Gewichtsvergleich von Schiffsantrieben mit konventionelle und supraleitenden Synchronmaschinen

spart, siehe Bild 4. Deshalb stoßen solche Motoren bei Entwicklungsprojekten auf besonderes Interesse.

3.2 Kabel

Wegen des Wegfalls des ohmschen Widerstandes, zumindest des Gleichstromwiderstandes, können die Leiter viel mehr Strom transportieren als herkömmliche Kupfer- oder Aluminiumleiter. Abhängig von der Kabelbauart sind dies nach heutigen Erfahrungen und Abschätzungen bei gleicher Spannung mindestens die doppelte bis zur zehnfachen Leistung. Von besonderer Bedeutung ist auch die Möglichkeit der erheblichen Erhöhung der Übertragungsleistung, ohne die Betriebsspannung erhöhen zu müssen.

Die bei den weltweit zahlreichen Projekten untersuchten Konzepte lassen sich unterscheiden nach Warm Dielectric (WD) und Cold Dielectric. (CD). Bild 5 zeigt Einleiterkabel dieser beiden Varianten. Beim WD-Kabel befindet sich nur der Innenleiter im Kryobereich, die elektrische Isolierung und der normalerweise koaxiale Kabelschirm aus Kupfer auf Raumtemperatur. Beim CD-Kabel sind sowohl der Innenleiter als auch der den gleichen Rückstrom tragende Schirm in

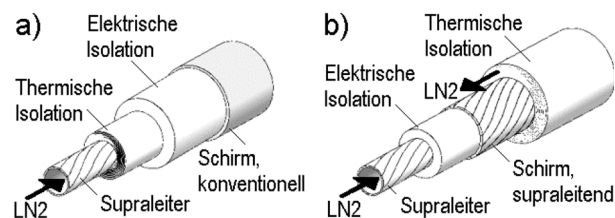


Bild 5: HTSL-Kabel mit warmem (a) und kaltem Dielektrikum (b)

Tabelle 1: Merkmale der WD- und CD-Kabel

Warmes Dielektrikum, WD	Kaltes Dielektrikum, CD
Höhere elektr. Verluste (Cu-Mantel), höhere Kühlleistung, geringere Kühlstations-Abstände	Geringere Verluste, höhere Stromtragfähigkeit,
Konv. extrudiertes Dielektrikum	Kryo-Isoliersystem
Weniger HTSL-Material	Mehr HTSL-Material
Induktivität ähnl. NL-Kabel	Kleine Induktivität, 1/5
höhere AC-Verluste	Geringere AC-Verluste
Magnetische Streufelder	Keine Streufelder
Wärme an Umgebung	keine Wärmeabgabe

geringem Abstand innerhalb des Kryobereichs angeordnet. Das Kühlmittel LN₂ stellt einen Bestandteil des Isoliersystems dar. Die i.a. flachen HTS-Leiter sind auf einem Trägerrohr verseilt aufgebracht.

Die aus dem unterschiedlichen Aufbau resultierenden Merkmale sind in Tabelle 1 gegenübergestellt. Wegen seiner Vorzüge dürfte sich voraussichtlich das CD-Kabel durchsetzen.

3.3 Strombegrenzer

3.3.1 Prinzip

Schon seit den 60er Jahren haben sich Strombegrenzer für den Kurzschlußschutz, sog. I_S -Begrenzer in konventioneller, lichtbogenbehafteter Technik bewährt. Sie sprechen im Kurzschlußfall sehr rasch an und begrenzen den Kurzschlußstrom, bevor er seinen Scheitelwert erreichen kann. Dadurch wird sowohl die thermische als auch die dynamische Beanspruchung der Betriebsmittel im nachgeordneten Netz reduziert, und sie können im Prinzip schwächer dimensioniert werden. Auch auf die Netzstabilität wirkt sich eine rasche Abschaltung positiv aus. Bisher werden diese Strombegrenzer nur in Sonderfällen bei besonderen Netzkonstellationen eingesetzt. Der herkömmliche Netzschutz

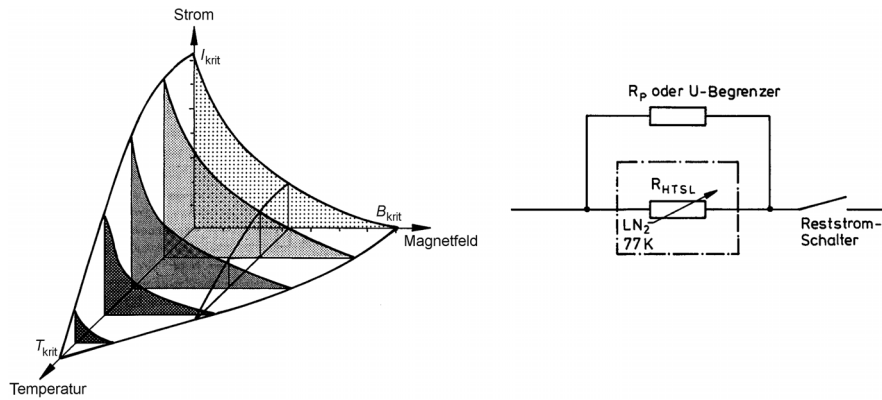


Bild 6: Existenzbereich der Supraleitung (links) und Prinzip des resistiven Strombegrenzers (rechts)

beruht hingegen auf dem Prinzip der gewollten Zeitverzögerung, um die Selektivität zu gewährleisten. Eine Strombegrenzung findet nicht statt. Die Betriebsmittel müssen so dimensioniert sein, daß sie den dabei auftretenden Beanspruchungen standhalten. Im Zusammenhang mit der Anwendung der Hochtemperatur-Supraleitung zur Strombegrenzung werden viele Einsatzmöglichkeiten der Strombegrenzer-Technik neu diskutiert und untersucht. Hinzu kommt, daß man im Zuge der Deregulierung stärker an die Grenzen der Netze geht. Strombegrenzer, z.B. in Netzkupplungen, können erhebliche Investitionskosten in Betriebsmittel höherer Kurzschlußfestigkeit sparen. Hingegen wird eine komplette Umstellung des Schutzkonzeptes zu Gunsten von Strombegrenzern auf absehbare Zeit ausscheiden. Anders kann die Situation bei zunehmendem Einsatz anderer supraleitender Betriebsmittel werden. Anstatt supraleitende Kabel oder Transformatoren kurzschlußfest zu machen, kann man sich vorstellen, daß man zu deren Schutz Strombegrenzer einsetzt, und damit die supraleitenden Aktivteile schwächer dimensioniert.

Die folgenden Ausführungen seien auf das Prinzip des sog. resistiven HTSL-Strombegrenzers (Bild 6) beschränkt. Während andere HTSL-Betriebsmittel im Normalfall stets supraleitend bleiben sollen, müssen supraleitende Strombegrenzer gezielt von der Supra- in die Normalleitung übergehen (Quench), und begrenzen dadurch den Strom. Der Supraleiter wird resistiv, wenn entweder der kritische Strom, die kritische Temperatur oder das kritische Magnetfeld überschritten werden. Beim resistiven Strombegrenzer erfolgt die Auslösung selbsttätig, wenn der Kurzschlußstrom den kritischen Strom überschreitet. Dem definierten und reproduzierbaren Übergang in die Normalleitung kommt deshalb besondere Bedeutung zu.

3.3.2 Vergleich zweier resistiver Begrenzerkonzepte

Zur Verdeutlichung der Vorgänge bei der Strombegrenzung sowie des Verhaltens unterschiedlicher Begrenzerkonzepte sollen nachstehend zwei Varianten verglichen werden:

a) *YBCO-Dünnschicht mit Au-Shuntschicht auf synthetischem Saphirsubstrat*

Ein bei Siemens aus Elementen modular aufgebauter Begrenzer besteht aus einer größeren Anzahl von Elementen. Jedes Element besteht aus einem Saphirwafer 100 mm Durchmesser, ca. $0,3\ \mu\text{m}$ YBCO von $J_C > 2\ \text{MA/cm}^2$ und ca. 100 nm Au-Shuntschicht. Eine Shuntschicht parallel zum Supraleiter ist notwendig, um „hot spots“ an Stellen, die wegen unvermeidlicher Fertigungsstreuungen lokal an Längenabschnitten etwas geringerer kritischer Stromdichte entstehen würden, zu vermeiden. Ein Demonstrator von 1 MVA Nennleistung verwendete je Phase 4 Elemente parallel und 7 in Reihe geschaltet. Er wurde mit 6 kV dreiphasig erfolgreich getestet. Bezieht man den Effektivwert der dreiphasigen Nennspannung auf die Leiterlänge je Phase, so sind das 10,7 V/cm. Der Durchlaßstrom-Scheitelwert, d.i. die Stromhöhe, auf welche der Kurzschlußstrom begrenzt wurde, lag mit dem 2- bis 3-fachen kritischen Strom sehr niedrig.

b) *BSCCO 2212 Massivmaterial mit metallischem Shunt und Epoxidharzverstärkung*

Von ACCEL, Nexans und anderen Partnern wurde ein 10 kV, 10 MVA-Demonstrator entwickelt und im Labor getestet, der auch ein Jahr im RWE-Netz eingesetzt war. Er verwendet Leitelemente aus BSCCO-Massivrohr (Durchmesser 50 mm, Wandstärke 4 mm), aufgelötet auf ein Rohr aus Widerstandsmaterial als Shunt mit 2,9 mm Wandstärke und mechanisch verstärkt mit faserverstärktem Kunststoff. Auch hier ist zur Vermeidung von „hot spots“ eine parallele Shuntschicht notwendig. Durch spiralförmige Schnitte im Rohr entsteht ein bifilarer Strompfad von 54 m Länge. Je Phase sind drei Elemente in Reihe geschaltet, so daß sich für 10 kV ein bezogener Wert von 0,62 V/cm errechnet. Die kritische Stromdichte des HTSL liegt bei 77 K bei ca. $1\ \text{kA/cm}^2$. Da hiermit, wie bereits Anfang der 90er Jahre durch Simulationsrechnungen vorausgesagt wurde, kaum eine Begrenzungswirkung erzielt wird, wurde die Betriebstemperatur auf ca. 65 K festgelegt, d.h. das Kühlmittel Flüssigstickstoff wird bei Unterdruck betrieben. Dort liegt die kritische Stromdichte bei ca. $3,5\ \text{kA/cm}^2$, somit liegt der Querschnitt nur bei 1/4 bis 1/3, was den Widerstand des Supraleiters beim Quench (Heizleistung) entsprechend erhöht und die zu erwärmende Masse reduziert. Damit konnte in Schaltversuchen an Komponenten eine Begrenzung auf den ca. 9-fachen kritischen Strom erreicht werden.

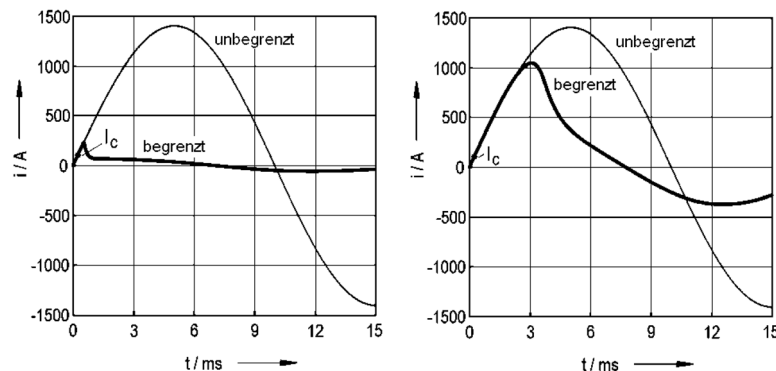


Bild 7: Simulierter begrenzter Stromverlauf und unbegrenzter Strom beim Strombegrenzer mit YBCO-Dünnschicht- (links) und mit BSCCO-Massivleiter (rechts)

In Bild 7 sind diese Abläufe anhand von Simulationsrechnungen an Modellansordnungen verdeutlicht. Die Modellrechnungen bilden den Stromfluß und den Erwärmungsvorgang in guter Übereinstimmung mit den Experimenten nach.

Das unterschiedliche Oberflächen-Masse-Verhältnis der beiden Varianten macht sich auch bei der Wiederabkühlung nach erfolgter Begrenzung bemerkbar. Mit Dünnschicht/Substrat-Anordnungen sind Rückkühlzeiten unterhalb einer Sekunde möglich. Sie gelangen damit in die Größenordnung der AWE-Zyklen (Automatische Wiedereinschaltung nach Kurzschlußabschaltung). Hingegen sind die Rückkühlzeiten von Massivmaterial weitaus höher, im Bereich einiger 10 Sekunden.

Nach diesem Verhalten scheint die Dünnschicht-Variante einige Vorteile im Hinblick auf die Anwendung aufzuweisen. Ihr Hauptnachteil besteht darin, daß die Materialien und das Herstellverfahren dazu sehr teuer und noch im Versuchsstadium sind, während es sich beim Massiv-BSCCO um bereits kommerziell verfügbares, kostengünstigeres Standardmaterial handelt.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Betriebsmittel für Stromversorgungsnetze in HTSL-Technologie weisen gegenüber der konventionellen Technik eine Reihe von Vorteilen auf, die sie für einen baldigen Einsatz in besonderen Fällen geeignet machen. Am ehesten wird dies nach Einschätzung vieler Fachleute vermutlich bei Kabeln und Strombegrenzern zunehmend der Fall sein. Bei elektrischen Maschinen werden es eher kleinere Maschinen für Antriebe, z.B. Schiffe, als Großgeneratoren sein, deren Entwicklungskosten enorm sind.

Da die Anwender, hauptsächlich die Energieversorgungsunternehmen, in erster Linie die Kosten im Auge haben müssen, die Erforschung und Entwicklung neuer Technologien aber immer mit erheblichen Kosten und Risiken verbunden ist, ist auch die Entwicklung der Supraleiteranwendung in der elektrischen Energietechnik weltweit noch für längere Zeit auf erhebliche öffentliche Förderung angewiesen. Längerfristig wird sich aber die Supraleiter-Anwendung nur dort auf breiterer Basis durchsetzen, wo unter Berücksichtigung des Gesamtsystems Kosten eingespart werden können oder wo die neue Technik erhebliche weitere Vorteile und Zusatznutzen erbringt.

Literatur

- [1] LINDMAYER, M. & J. GRUNDMANN: Hochtemperatur-Supraleiter in Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik – Stand der Forschung. ETG-Tagung Technische Innovationen in Verteilungsnetzen, Würzburg 2005. ETG Fachbericht Bd. 98, VDE Verlag, Berlin/Offenbach 2005.
Umfangreiche weitere Literatur dort.

Der Vortragende dankt Herrn Dipl.-Ing. Jörn Grundmann für die Mitarbeit am Manuskript